



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ Off nl gungsschrift  
⑩ DE 199 45 944 A 1

⑤1 Int. Cl.7:  
G 01 N 27/90

②1 Aktenzeichen: 199 45 944.4  
②2 Anmeldetag: 24. 9. 1999  
④3 Offenlegungstag: 31. 5. 2001

DE 199 45 944 A 1

⑦1 Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:  
Daalmans, Gabriel, 91315 Höchstadt, DE; Ludwig,  
Klaus, 91058 Erlangen, DE

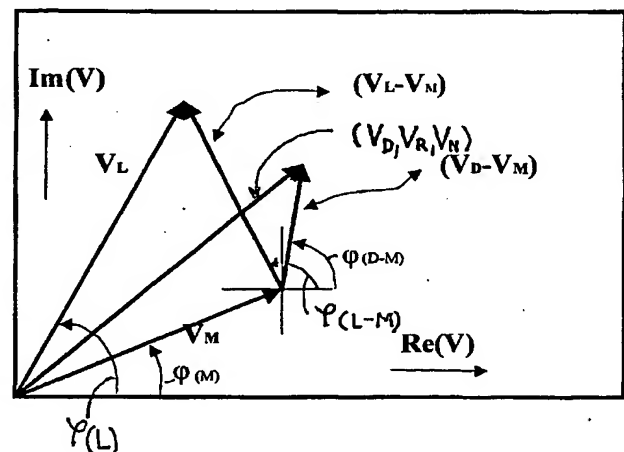
⑤6 Entgegenhaltungen:  
US 54 30 376  
H. HASHIKAWA et al.: "Eddy Current Distribution  
Using...", Materials Evaluation 1999, June,  
S.587-593;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zur zerstörungsfreien Detektion und Bestimmung von Defekten in elektrisch leitendem Material mit Anwendung eines Wirbelstrom-Prüfverfahrens

- ⑤7 Verfahren zur Bestimmung der Tiefe von Defekten, insbesondere von Rissen in Bauteilen, wie z. B. Turbinenschaufeln, mittels Wirbelstromverfahrens, wobei die Verfahrensschritte
- a) Klassifizierung des Defekts als nutzenähnlich oder nicht-nutzenähnlich;
  - b) Wahl einer für die Auswertung von der Klassifizierung und dem Meßkopf abhängig anzuwendenden normierten Meßgröße (V);
  - c) Bildung einer Eichkurve versus Nuttiefe;
  - d) bis g) Induktionsspannungsmessungen, Normierungen der Meßwerte, Einordnung in die Eichkurve, Bestimmung der Rißtiefe.



DE 199 45 944 A 1

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur zerstörungsfreien Detektion und auch Bestimmung von Defekten, insbesondere von Rissen und dgl., in elektrisch leitendem Material. Es wird hierzu ein Wirbelstrom-Prüfverfahren angewendet.

Nicht nur die Detektion von Defekten in Werkstücken, sondern auch die nähere Bestimmung ihrer Form ist ein wichtiges Arbeitsgebiet der Technik. Die bekannte nicht-zerstörungsfreie Untersuchung von Materialien auf z. B. in ihnen enthaltenen Risse, z. B. das Herauspräparieren eines im Material vorhandenen Risses in einem Querschliff, ist in vielen Fällen nicht anwendbar. Zum Beispiel ist es für Gasturbinenschaufeln von eminenter Bedeutung, sowohl ein neues Gasturbinenschaufelrad auf Rißfreiheit in den Schaufeln noch vor Inbetriebnahme desselben zu überprüfen, als auch bei schon in Betrieb befindlichen Gasturbinenschaufelrädern deren Schaufeln laufend in zeitlichen Abständen zu überwachen. Zum Beispiel sollen entstandene Risse nicht nur entdeckt werden, sondern auch in soweit quantitativ erfaßt werden, daß eine Bewertung möglich ist, ob ein z. B. bereits entstandener Riß für den weiteren Betrieb tolerierbar ist oder ein Ersatz der Schaufel erforderlich ist. Dazu ist insbesondere die Ermittlung des Maßes der Tiefe eines entdeckten Risses von Bedeutung und in vielen Fällen interessiert auch dessen spezielle Form und insbesondere die Breite eines Risses. Dies dient z. B. einer Klassifizierung in der Praxis häufiger oder wiederholt auftretender Risse.

Im Stand der Technik (DE-PS 197 10 743) ist bereits ein Wirbelstromverfahren zur Detektion und auch zur Tiefenbestimmung von Rissen beschrieben.

Beim Wirbelstromverfahren wird eine mit Hochfrequenzstrom gespeiste Induktionsspule auf das zu untersuchende Material des Prüflings, z. B. eines Werkstückes, auf die Oberfläche desselben aufgesetzt. Im Material auftretende Wirbelströme können mit Hilfe einer Prüfspule eines Detektors erfaßt werden. An den Anschlüssen der Prüfspule kann eine auftretende Induktionsspannung gemessen werden, die proportional der magnetischen Flußdichte ist, die mit den auftretenden Wirbelströmen verbunden ist.

Als Detektor kann entweder ein Magnetometer mit einer Prüfspule zur Messung der Amplituden der Flußdichte verwendet werden oder man benutzt einen als planares Gradiometer ausgebildeten Detektor mit differentieller Prüfspule, mit dem bzw. mit der der örtliche Gradient der erzeugten Flußdichte zu erfassen ist.

Zur Bestimmung des Maßes der Tiefe eines Risses ist die Amplitudenmessung der an der Prüfspule auftretenden Induktionsspannung zu nutzen. Zur Auswertung als Maß der Rißtiefe ist zur Kalibrierung ein Testkörper bzw. eine Materialprobe desselben oder des gleichen Materials zu verwenden, wobei in dem Testkörper Nuten als künstlich erzeugte Risse vorgesehen sind.

Aus den folgenden Gründen ist das soweit bekannte Verfahren jedoch nur beschränkt einsetzbar, und zwar

1. weil dieses Verfahren nur anwendbar ist auf nutenähnliche Risse, wie sie im Testkörper bekanntermaßen als Nuten künstlich erzeugt sind. In der Praxis treten aber, wie festgestellt worden ist, nicht nur nutenähnliche Risse in Werkstücken auf, sondern auch als nicht-nutenähnlich zu bezeichnende mäanderförmige und/oder T-förmige Risse. Solche ebenfalls auftretende Risse würden mit den bekannten voranstehend beschriebenen Maßnahmen infolgedessen falsch beurteilt und unzutreffend klassifiziert werden.
2. Das voranstehend beschriebene Verfahren ist bei

Erfassung lediglich der Spannungsamplitude des Detektors, die proportional der magnetischen Flußdichte ist, stark abhängig von einem kaum zu vermeidenden Luftspalt zwischen dem Werkstück bzw. Prüfling und dem Detektor des Meßkopfes. Das Auftreten eines solchen Luftspaltes zwischen Meßkopf, bzw. seiner Prüfspule, und dem Prüfling ist auch als Abhebeeffect bekannt. Insbesondere bei der abtastenden Überprüfung von Bauteilen in deren eingebauten Zustand ist eine luftspaltfreie, d. h. einen Abhebeeffect ausschließende Führung des Meßkopfes auf dem Prüfling nicht zu gewährleisten. Dies bedingt dann aber einen größeren Fehler in der Bestimmung der Rißtiefe.

3. Die Amplitude der mit der im Meßkopf befindlichen Prüfspule zu messenden Induktionsspannung ist nicht nur von der Lage des Risses, dessen Typ und dessen Größe sondern auch von der Höhe des im Material des Prüflings erregten Magnetfeldes, dessen Frequenz der Erregung und der Gestaltung des Meßkopfes sowie auch vom Material des Prüflings abhängig. Dies bedingt, daß das Verfahren dieses Standes der Technik auch empfindlich ist gegen Änderungen, die die voranstehend genannten physikalischen Größen beeinflussen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es somit, ein erfindungsgemäßes Verfahren anzugeben, das dahingehend verbessert ist, daß die voranstehend genannten Einschränkungen und Fehlerquellen wenn auch nicht vollständig so doch in hohem Maße beseitigt sind.

Die der Erfindung gestellte Aufgabe wird mit den Maßnahmen bzw. mit den Verfahrensschritten des Patentanspruches 1 gelöst und weitere Ausgestaltungen der Erfindung, insbesondere für eingehendere Charakterisierung detektierter Defekte, insbesondere Risse, im Material des Prüflings gehen aus den Unteransprüchen hervor.

In eine Übersicht gebender Weise beschrieben, umfaßt die Erfindung Maßnahmen, zu denen ein erster Verfahrensschritt gehört, in dem ein im Prüfling detektierter Defekt als Riß klassifiziert wird. Dies erfolgt durch Vergleich der am Defekt ermittelten Induktionsspannung mit Induktionsspannungen, die an als Testkörper dienenden Referenzkörpern desselben bzw. des gleichen Materials wie das des Prüflings ermittelt worden sind. Es werden vorbereitete Referenzkörper verwendet, die künstliche Nuten mit verschiedenen Tiefen und ggfs. verschiedenen Breiten haben, die künstlich in diesen erzeugt sind. Dasselbe Meßverfahren wie es für die Untersuchung des Prüflings durchgeführt wird, wird auch auf diese Referenzkörper angewendet, nämlich um Induktionsspannungen, und zwar für die Erfindung notwendigerweise diese Spannungen nach Betrag und Phase, mit der Prüfspule des Detektors des Meßkopfes zu erfassen. Es werden Referenzkörper verwendet, die als Nuten künstlich erzeugte (noch nachfolgend noch näher erörtert) nutenähnliche "Risse" mit verschiedener Tiefe und anderweitig geformte "Risse" als Referenzen enthalten.

Die Untersuchungen werden bei unterschiedlichen Frequenzen der Magnetfelderregung ausgeführt, damit gegebenenfalls vorhandene, von der Tiefe abhängige Inhomogenitäten bezüglich der Rissbreite entdeckt werden können.

Eine weitere Maßnahme des erfindungsgemäßen Verfahrens ist, entweder ein Magnetometer zu verwenden, das insbesondere dann zweckmäßigerweise zu benutzen ist, wenn ein nur kleiner Signal-Rausch-Abstand vorliegt. Wie noch näher erläutert wird, wird bei Magnetometer-Meßkopf die Größe  $tg\varphi$ , der jeweils gemessenen Induktionsspannung als Auswertgröße abgeleitet. Diese ist weitgehend wesentlich geringer vom Abhebeeffect beeinflusst. Bevorzugt wird je-

doch ein insbesondere planares Gradiometer benutzt, das bei Abgleich weitgehend frei von Einfluß eines Abhebeeffects ist.

Mit der Erfindung wird der Einfluß der Gestaltung des Meßkopfes, der Höhe des Erregerstromes, seiner Frequenz und auch des Materials des Prüflings dadurch reduziert, daß die an der Prüfspule auftretenden am Prüfling gemessenen Induktionsspannungen – wieder Betrag und Phase – anhand vergleichbarer, an Referenzkörpern gemessener Spannungen normiert werden. Bei Verwendung eines Magnetometers als Detektor ist die Normierungsspannung diejenige Induktionsspannung (VM), die an der Prüfspule des Detektors gemessen wird, wenn der Meßkopf auf ein defektfreies Material aufgesetzt ist, das dasselbe oder das gleiche ist wie das des Prüflings. Bei Verwendung eines Gradiometers ist das Normierungssignal dasjenige, das an einer Nut eines Referenzkörpers (desselben oder des gleichen Materials) unter denselben Meßbedingungen gemessen wird. Die Auswahl des dafür zu verwendenden Referenzkörpers bzw. der dafür zu verwendenden als Norm dienenden Nut orientiert sich an der jeweiligen Aufgabe. Sind im Prüfling vorhandene Risse mit Abmessungen ihrer Tiefe im Millimeterbereich zu messen, sollte die als Normnut des Referenzkörpers herangezogene Nut möglichst auch etwa einmal, insbesondere etwa 2-mal so tief bemessen sein.

Zur Bestimmung der Ristiefe im Prüfling wird jeweils die auf die Rißklasse und den Meßkopf geeignetste, von der Induktionsspannung abgeleitete Meßgröße gewählt und normiert und verglichen mit den gleichartig ermittelten Meßgrößen, die bei Messung am/an Referenzkörper(n) mit Nuten unterschiedlicher Tiefe und vergleichbarer Nutbreite gemessen worden sind. Als Ristiefe wird das Maß der Tiefe derjenigen Nut definiert, an der eine nächst gleich große Meßgröße ermittelt worden ist. Für den Fall, daß die tatsächliche Breite des entdeckten Risses des Prüflings wesentlich von der Breite der zum Vergleich herangezogenen Nut des Referenzkörpers abweicht, ist ein Korrekturfaktor vorzusehen, der empirisch ermittelt wird.

Weitere Erläuterungen der Erfindung werden anhand der zur Erfindungsoffenbarung gehörenden, nachfolgend beschriebenen Figuren gegeben.

Fig. 1 zeigt in der komplexen Spannungsebene die mit einem Magnetometer gemessenen Induktionsspannungen V: VM = Spannung gemessen an fehlerfreiem Material, VD, VR, VN = Spannung gemessen an einem Defekt, einem Riß, einer künstlich hergestellten Nut; VL = Spannung gemessen mit dem Meßkopf in Luft.

Fig. 2 zeigt wieder in der komplexen Spannungsebene die voranstehend genannten Induktionsspannungen, gemessen mit einem planaren Gradiometer.

Fig. 3 zeigt die an einem Defekt/Riß ermittelte Differenzspannung  $\langle V_D - V_M \rangle$  in der normierten komplexen Spannungsebene. Die Normierung wird/wurde anhand der mit einem Magnetometer an fehlerfreiem Material gemessenen Induktionsspannung VM durchgeführt.

Die Fig. 4 zeigt die mit einem abgeglichenen planaren Radiometer am Defekt/Riß ermittelte normierte Induktionsspannung  $\langle V_D \rangle$  in der normierten komplexen Spannungsebene. Die Normierung ist anhand einer an einer Normnut gemessenen Induktionsspannung durchgeführt.

Fig. 5 zeigt drei Beispiele, drei Klassen unterschiedlicher Formen auftretender Risse. 5A = nutenähnlicher Riß, 5B = nicht-nutenähnlicher, T-förmiger Riß und 5C = nicht-nutenähnlicher, mäanderförmiger Riß.

Fig. 6 zeigt in der komplexen Spannungsebene die normierten Werte an Nuten gemessener Induktionsspannungen mit Tiefen der Nuten zwischen 1,0 und 0,2 mm und zum einen für 80 µm und zum anderen für 230 µm Breite der Nu-

ten.

Fig. 7 zeigt einen hilfswisen Aufbau zur Ermittlung der Abhängigkeit der gemessenen Induktionsspannungen von der Breite eines jeweiligen Risses.

Fig. 8 zeigt die Meßergebnisse eines Anwendungsbeispiels der Messung an nutenähnlichem Riß mittels eines Magnetometers.

Fig. 8A zeigt die gemessenen Induktionsspannungen in der komplexen Spannungsebene und Fig. 8B zeigt die dazu ermittelte Eichkurve.

Fig. 9 zeigt die Meßergebnisse eines Anwendungsbeispiels der Messung an nutenähnlichem Riß mittels eines Gradiometers.

Fig. 9A zeigt die gemessenen Induktionsspannungen in der komplexen Spannungsebene und Fig. 9B zeigt die dazu ermittelte Eichkurve.

Fig. 10 zeigt die Meßergebnisse eines Anwendungsbeispiels der Messung an nicht-nutenähnlichem Riß mittels eines Gradiometers. Fig. 10A zeigt die gemessenen Induktionsspannungen in der komplexen Spannungsebene und Fig. 10B zeigt die dazu ermittelte Eichkurve.

Zum allgemeinen Verständnis des Verfahrens zeigt die Fig. 1 als Vektordarstellung in der komplexen Spannungsebene mit  $\text{Re}(V)$  als Realteil auf der Abszisse und mit  $\text{Im}(V)$  als Imaginärteil auf der Ordinate die Spannungsvektoren mit Betrag und Phase  $\phi$ , und zwar die Induktionsspannungen V, die mit der Prüfspule erfaßt werden:

VM bei Messung auf ungestörtem, defektfreiem Material, VD bei Messung auf dem Material am Ort eines Defekts D, z. B. eines Risses, und

VL bei Messung, bei der der Meßkopf derart weit vom Prüfling entfernt positioniert ist, daß in diesem keine Wirbelströme mehr erzeugt werden bzw. auftreten. Es gelten also die Gleichungen:

$$V_x = |V_x| \cdot [\cos\phi_x + j \sin\phi_x]$$

$$\text{bzw. } V_x = \text{Re}(V_x) + j \text{Im}(V_x)$$

X = L, D, M, N

An einer Nut N eines Referenzkörpers gemessene Induktionsspannungen VN entsprechen der Spannung VD, da in dieser Betrachtung die Nut an die Stelle eines Defekts tritt und meßtechnisch kein relevanter Unterschied besteht zwischen der Messung der Induktionsspannung VD am Ort eines Risses des Prüflings und der Messung der Induktionsspannung VN am Ort einer Nut eines Referenzkörpers.

Die Fig. 1 zeigt außerdem die Vektoren der Differenzspannungen  $(V_D - V_M)$  und  $(V_L - V_M)$  und die jeweiligen Phasenwinkel  $\phi$ . Die Fig. 1 gilt für die Meßergebnisse, die man mit einem Magnetometer als Detektor des Meßkopfes erhält.

Die Fig. 2 zeigt die Verhältnisse, die sich einstellen, wenn, vergleichsweise zur Fig. 1, die Messung mittels eines planaren Gradiometers als Detektor bzw. Prüfspule des Meßkopfes ausgeführt wird. Entsprechend der Eigenschaft des Gradiometers ist die als Spannungsdifferenz der differentiellen Prüfspule des Detektors des Gradiometers bei Messung an einem Defekt auftretende Induktionsspannung sehr viel größer als die am ungestörten Material oder in Luft zu erhaltenden Spannungen VM und VL.

Die mit Gradiometer oder Magnetometer gemessene Induktionsspannung VL ist im wesentlichen allein durch die Höhe und Frequenz des das Magnetfeld erregenden Induktionsstromes und auch durch die Ausgestaltung des Meßkopfes bestimmt. Die Induktionsspannung VM hängt zusätzlich dazu auch noch vom Material des Prüflings, insbesondere von seiner spezifischen elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität und zusätzlich auch vom Ab-

stand zwischen Meßkopf und Prüfling bzw. Referenzkörper ab. Die an einer Stelle eines Defekts, z. B. eines Risses, gemessene Induktionsspannung  $V_D$  hängt außerdem auch noch von der Größe des Defekts, bei einem Riß von der Tiefe und der Breite, und von der Lage und der geometrischen Beschaffenheit des Defekts ab.

Für die Erfindung vorteilhafter ist es, als Meßwert den Differenz-Spannungswert auszuwerten, nämlich

$$(V_D - V_M) = |V_D - V_M| \cdot [\cos\varphi_{(D-M)} + j \sin\varphi_{(D-M)}]$$

$$(V_D - V_M) = \operatorname{Re}(V_D - V_M) + j \operatorname{Im}(V_D - V_M)$$

Bei vernachlässigbaren, nur kleinen Defekten im Prüfling geht diese Meßgröße nämlich auf den Wert Null. Bei großem Defekt, z. B. nahezu fehlendes Material am Prüfling, wächst das Maß dieser Differenzspannung an bis auf maximal

$$(V_L - V_M) = |V_L - V_M| \cdot [\cos\varphi_{(L-M)} + j \sin\varphi_{(L-M)}]$$

$$(V_L - V_M) = \operatorname{Re}(V_L - V_M) + j \operatorname{Im}(V_L - V_M)$$

Als Meßgröße zur Tiefenbestimmung eines Risses wird im Stand der Technik die Amplitude Betrag  $|V_D - V_M|$  gemessen. Dies erfolgt mittels eines Magnetometers. Die gemessene Amplitude wird mit der Amplitude einer in gleicher Weise gemessenen Spannung verglichen, nämlich die an einer in einem Referenzkörper erzeugten künstlichen Nut, wobei der Referenzkörper aus demselben oder dem gleichen Material wie das des Prüflings besteht, gemessen worden ist. Wegen des großen Einflusses des Abhebeeffects auf die jeweilige Amplitude der gemessenen Spannungen ist die Rißtiefenbestimmung gemäß dem Stand der Technik ungenau. Außerdem gibt es in der Praxis nicht nur nutenähnliche Risse, sondern auch Risse mit einer lokal variablen Rißbreite. Zu messende Risse werden aber bei der Rißtiefenbestimmung im Stand der Technik sämtlich nach dem gleichen Verfahren untersucht. Dies führt zu weiteren Ungenauigkeiten und/oder Fehlern im Ergebnis einer solchen Rißtiefenbestimmung.

Es ist gemäß der Erfindung vorgesehen, in einem ersten Schritt mit Anwendung des Wirbelstromverfahrens zunächst erst einmal eine Klassifizierung bzw. Einteilung der Risse in nutenähnliche und in nicht-nutenähnliche Risse vorzunehmen. In einem zweiten Schritt wird dann erfindungsgemäß die für die jeweils betreffende Rißklasse gemäß der Erfindung jeweils vorzusehende, nachfolgend erörterte Meßgröße ausgewählt, die im Ergebnis des Wirbelstromverfahrens enthalten ist.

Es ist gemäß der Erfindung für nutenähnliche Risse wesentlich vorteilhafter, die Phase  $\varphi$  bzw. den Tangens  $\varphi$  der Induktionsspannung  $V_D - V_M$  auszuwerten. Für nicht-nutenähnliche Risse, wie noch nachfolgend näher erörtert, ist es gemäß der Erfindung wesentlich vorteilhafter, den Imaginärteil der Spannung  $\operatorname{Im}(V_D - V_M)$  als Meßgröße auszuwerten. In allen Fällen, wo der Signal-Rauschabstand groß genug ist, wird für die Messung der Induktionsspannungen ein planares Gradiometer benutzt. Diese beiden voranstehend beschriebenen alternativen Maßnahmen der Auswahl der jeweils günstigsten, weiter auszuwertenden Meßgröße sind in der nachfolgenden Beschreibung als erfindungsgemäßer jeweiliger Schritt 2 bezeichnet.

Nunmehr wird eine Erläuterung zum Schritt der Normierung – auch als Schritt 3 bezeichnet – gegeben. Wie schon zum Stand der Technik erwähnt, ist die mit dem Detektor am Ort eines Defekts gemessene Induktionsspannung nicht nur von diesem Defekt, sondern auch von noch anderen physi-

kalischen Größen, wie z. B. der Höhe des Erregerstroms, der Frequenz desselben, der Meßkopfgestaltung und dem Material abhängig, auf dem die Messung erfolgt. Dies ist nachteilig, da Schwankungen bzw. Ungenauigkeiten dieser gemessenen Spannungswerte in die Genauigkeit der z. B. Rißtiefenbestimmung eingehen. Es ist deshalb als weiterer erfinderischer Schritt vorgesehen, die Induktionsspannungs-Differenz ( $V_D - V_M$ ), gemessen mit dem Magnetometer, bzw. die mit dem Gradiometer gemessene Induktionsspannung  $V_D$  zu normieren. Die Normierung erfolgt in der komplexen Ebene, jeweils getrennt für den Imaginärteil und den Realteil. Bei Anwendung eines Magnetometers wird als Normierungsgröße entweder die am ungestörten Material gemessene Induktionsspannung  $V_M$  oder die Differenzspannung  $V_L - V_M$  benutzt. Die normierte Defektspannung ergibt sich für diesen Fall als

$$\langle V_D - V_M \rangle = \operatorname{Re}(V_D - V_M) / \operatorname{Re}(V_M) + j \operatorname{Im}(V_D - V_M) / \operatorname{Im}(V_D)$$

Die Fig. 3 zeigt die mit der Prüfspule eines Magnetometer-Detektors an einem Defekt gemessene Induktionsspannung in der normierten Spannungsebene, normiert mit der Messung bzw. Induktionsspannung, die am fehlerfreien Material (Messung  $V_M$ ) ausgeführt worden ist. Verwendet man anstelle der voranstehend beschriebenen Maßnahme ein planares Gradiometer, wird als Normierungsgröße die gemessene Induktionsspannung  $V_{NN}$  benutzt, die mit dem (selben) Meßkopf bzw. Detektor an einem Normdefekt, das ist z. B. die Nut eines Referenzkörpers, gemessen worden ist. Es gilt

$$V_{NN} = \operatorname{Re}(V_{NN}) + j \operatorname{Im}(V_{NN})$$

$$\langle V_D \rangle = \operatorname{Re}(V_D) / \operatorname{Re}(V_{NN}) + j \operatorname{Im}(V_D) / \operatorname{Im}(V_{NN})$$

In der komplexen Spannungsebene graphisch dargestellt, zeigt dies die Fig. 4. Zu erwähnen ist dazu, daß als Normdefekt ein künstlich erzeugter Defekt, z. B. eine künstlich erzeugte Nut im Referenzkörper vorgesehen worden ist, die große Ähnlichkeit mit dem detektierten und zu untersuchenden Defekt im Prüfling hat. Für die Untersuchung eines Prüflings auf Risse ist ein solcher künstlicher Defekt z. B. eine Nut (Normnut  $_{NN}$ ).

Nachfolgend werden noch Erläuterungen zum obengenannten ersten Schritt der Erfindung, nämlich der Charakterisierung eines detektierten Defekts, z. B. Risses, gegeben.

Erfahrungsgemäß treten in metallischen Prüflingen üblicherweise mehrere Typen von Rissen auf, zu denen mit drei Darstellungen in Fig. 5 eine jeweilige bildliche Ansicht gegeben ist. Fig. 5A zeigt das Bild eines nutenähnlichen Risses. Die Fig. 5B und 5C zeigen nicht-nutenähnliche Risse, nämlich 5B einen sich in der Tiefe seitlich fortsetzenden T-förmigen Riss und 5C soll einen mäanderförmigen Riss zeigen, der an der Oberfläche des Prüflings wie ein nutenähnlicher Riss beginnt, sich aber dann in der Tiefe mit Breiten- und Richtungsänderungen fortsetzt. Verständlicherweise ist es praktisch nicht möglich, für die Beispiele der Fig. 5B und 5C künstlich nachgeformte Nuten für Referenzkörper herzustellen. Auftretende Risse können ganz grob gesehen, jedoch zweckmäßigerweise in solche zwei Klassen eingeteilt werden, wie das schon oben erwähnt worden ist. Zum einen ist dies die Klasse der nutenähnlichen Risse mit einer über die Tiefe des jeweiligen Risses gleichbleibenden Breite und Orientierung derselben und zum anderen die Klasse der nicht-nutenähnlichen Risse, wobei die Breite und Orientierung des Risses sich von der Oberfläche bis in die Tiefe ändert (nämlich zu denen auch die mäanderförmigen Risse gehören).

Die mit dem Meßkopf bzw. dem Detektor zu messenden Induktionsspannungen sind für diese unterschiedlichen Rißtypen (bei ansonsten gleichen Meßbedingungen) bei gleicher Tiefe des Risses jedoch unterschiedlich groß. Zur korrekten Erfassung der Tiefe eines Risses muß also dieses Faktum berücksichtigt werden. Es ist also Voraussetzung, zunächst oder schließlich bei der Auswertung des Meßergebnisses den Typus eines jeweiligen Risses erkannt bzw. charakterisiert zu haben.

Die Klassifizierung detektierter Risse beider Klassen erfolgt dadurch daß:

1. die für den/an dem Ort des jeweiligen Risses gemessene Induktionsspannung  $V_D$  wird in der komplexen Spannungsebene nach Betrag und Phase mit solchen Induktionsspannungen verglichen, die an verschiedenartigen Nuten einer oder mehrerer Referenzkörper desselben bzw. gleichen Materials mit ein und derselben Meßeinrichtung und Meßkopf gemessen worden sind. Dazu werden die an den Nuten gemessenen Spannungen und die an dem detektierten Riß gemessene Spannung normiert mit bzw. anhand derjenigen Spannung, die an einer ausgewählten Nut der voranstehend genannten Nuten gemessen worden ist. Für die Erfindung wird hierzu vorteilhafterweise diejenige Spannung herangezogen, die an der Nut mit der größten Tiefe gemessen worden ist. Die normierten Induktionsspannungen  $\langle V_N \rangle$  der Nuten liegen in – wie festzustellen – relativ engen Grenzen unabhängig von ihrer Tiefe, Breite und auch von der Frequenz des Induktionsstroms der Magnetfelderregung. Die an detektierten nutenähnlichen Rissen gemessenen normierten Induktionsspannungen  $\langle V_D - V_M \rangle$  bzw.  $\langle V_D \rangle$  liegen im übrigen ebenfalls in einem solchen engen Bereich oder einem solchen wenigstens nahekommenen Toleranzbereich. Hierzu sei auf die Fig. 6 verwiesen. Die Fig. 6 zeigt auf Abszisse und Ordinate die normierten Werte, und zwar Realteil und Imaginärteil wie dort angegeben.  $V_N$  ist die an einer jeweiligen Nut gemessene Induktionsspannung. Der Meßwert  $V_{NN}$  ist die als Normierungsbasis herangezogene Induktionsspannung, die an der als Normnut ausgewählten Nut, z. B. der tiefsten Nut des/der Referenzkörper gemessen worden ist. In Fig. 6 sind mit Punkt die Spannungen eingetragen, die an Nuten mit 80 µm Breite gemessen worden sind. Mit Kreuzen sind die Spannungen eingetragen, die an 230 µm breiten Nuten gemessen worden sind. Die unterschiedlichen Meßpunkte gehören zu Nuten unterschiedlicher Tiefe. Aus Fig. 6 ist auch zu ersehen, daß unterschiedlich breite Nuten und damit auch unterschiedlich breite nutenähnliche detektierte Risse auf einer Kurve liegen. Die Messungen zur Fig. 6 sind mit 1 MHz ausgeführt. Der in der Fig. 6 zusätzlich eingetragene Pfeil zeigt, wohin in etwa ein Meßpunkt verschoben ist, wenn eine höhere Frequenz, etwa 4 MHz, der Erregung angewendet wird. Nutenähnliche Risse liegen auf oder wenigstens sehr nahe der Kurve der Fig. 6, die somit als Referenzkurve für Nuten gilt. Nicht-nutenähnliche Risse liegen nicht auf dieser Referenzkurve. T-förmige Risse machen sich dadurch bemerkbar, daß deren Meßpunkte in Fig. 6 etwa parallel der Abszisse weiter nach links verschoben liegen. Sie können bis über die in der Fig. 6 eingetragene Diagonale des Diagramms verschoben sein. Diese Verschiebung beruht auf dem größeren Verlustanteil in den an solchen nicht-nutenähnlichen Rissen gemessenen Induktionsspannungen.
2. Am detektierten Riß werden mehrere Induktions-

spannungen, nämlich für jeweils unterschiedliche Frequenz der Erregung, gemessen und in der normierten Spannungsebene der Fig. 6 betrachtet. Dies liefert weitere Information über die Art eines Risses.

Nachfolgend werden noch Erläuterungen zur Minimierung des Abhebeeffects, obiger Schritt 2, gegeben. Wie bereits zum Stand der Technik erwähnt wurde, ist bei Benutzung eines Magnetometers damit zu rechnen, daß bei den verschiedenen ausgeführten Messungen unterschiedlich große Distanz zwischen Meßkopf bzw. Prüfspule und Prüfling oder Referenzkörper von der tatsächlichen Rißtiefe/Nuttiefe abweichende Maße der Tiefe vortäuschen können. Behoben werden kann dieser Umstand zum einen durch die oben erwähnte Verwendung eines Gradiometers (anstelle eines Magnetometers). Es kann dieser Effekt aber auch dadurch gemindert werden, daß eine optimierte Auswahl der aus der gemessenen Induktionsspannung abgeleiteten Auswertegröße getroffen wird. Für diese Auswahl wird die Erfahrung benutzt, daß der Realteil einerseits und der Imaginärteil andererseits der mit dem Detektor gemessenen Induktionsspannung sich beide in etwa in gleichem Maße mit dem Abhebeeffect ändern. Das führt dazu, daß in erster Näherung die Amplitude z. B. der Spannung  $V_M$  abhängig vom oben erwähnten Abstand unterschiedlich groß ist, obwohl es sich um ein und denselben Defekt handelt. Dasselbe gilt für die gemessene Spannung  $V_D$ . Im Gegensatz dazu wird die jeweilige Phase  $\phi$  wesentlich weniger unbeeinflusst. Hierzu siehe auch die Fig. 1. Die erfindungsgemäße Erkenntnis ist, daß insbesondere bei Messung mit dem Magnetometer der Phasenwert  $\phi$  eine weitaus besser geeignet auszuwertende physikalische Größe ist. Erfindungsgemäß wird insoweit bei der Erfindung bei nutenähnlichen Rissen und Nuten als Auswertegröße der tangens  $\phi$  der jeweils gemessenen komplexen Induktionsspannung  $V$  genutzt. Damit wird eine wesentlich erhöhte Genauigkeit der Bestimmung der jeweiligen Tiefe eines Risses (bzw. einer Nut) erreicht. Zur Ermittlung der tatsächlichen Rißtiefe ist daher erfindungsgemäß die Normierung gemäß dem schon erwähnten Schritt 3 vorzunehmen, und zwar entweder mit tangens  $\phi(M)$  bei Gradiometermessung oder mit tangens  $\phi(L - M)$  für Magnetometermessung. Falls nur kleine Risse vorliegen, genügt es, die Normierung für tangens  $\phi(M)$  vorzunehmen, da damit bereits ein ausreichendes Maß interessierender Genauigkeit erzielt wird.

Die Tiefe der in dem/den Referenzkörper(n) hergestellten Nuten ist bekannt oder wird optisch gemessen.

Nachfolgend werden noch Erläuterungen zum erfinderschen Schritt der eigentlichen Rißtiefenbestimmung (Schritt 4) gegeben. Nach getroffener Wahl der Art des Meßkopfes (Magnetometer, Gradiometer) und erfolgter Klassifizierung des Risses gemäß des Schrittes 1 wird die voranstehend beschriebene Wahl der Auswertegröße (Schritt 2) getroffen. Bei nutenähnlichen Rissen wird die Auswertegröße tangens  $\phi(D)$  gewählt, nämlich wie voranstehend beschrieben. Bei nicht-nutenähnlichen Rissen, z. B. Rissen nach Fig. 5B, ist es optimaler, daß nur der Imaginärteil der gemessenen Induktionsspannung ausgewertet wird. Bei solchen T-Rissen ist nämlich der Realteil der Induktionsspannung  $V_D$  nicht proportional der Rißtiefe.

Zur Durchführung der Klassifizierung eines jeweiligen Risses werden Messungen an einem oder mehreren Referenzkörpern desselben bzw. gleichen Materials wie das des Prüflings durchgeführt, wobei dieser eine oder diese mehreren Referenzkörper künstlich erzeugte Nuten mit unterschiedlicher Tiefe und gleicher Breite haben. Man benutzt diese dabei bzw. daran erhaltenen, gemessenen Induktionsspannungen zur Erstellung einer Eichkurve (Fig. 8B bis

10B), die den Zusammenhang zwischen der jeweils gemessenen Spannung und der tatsächlichen Nuttiefe erkennbar macht. Dazu werden die an der jeweiligen Nute gemessenen Induktionsspannungen mit bzw. anhand des Signals der ausgewählten Normnut normiert. Dies ist bereits oben zum Schritt 3 näher erläutert. Die gleiche Normierungsart wird auch für die an den detektierten Rissen gemessenen Induktionsspannungen durchgeführt. Für den Fall der T-förmigen Risse wird bevorzugt die oben erwähnte Normierung für die Imaginäranteile  $\text{Im}V_{\text{NN}}$  bzw.  $\text{Im}(V_L - V_D)$  durchgeführt.

Da die zu messenden Induktionsspannungen  $V$  auch von der Breite eines Defekts, z. B. Risses, abhängig sind, soll gemäß Weiterbildung auch die Breitenabmessung im Rahmen der Bestimmung der Rißtiefe berücksichtigt werden. Dazu muß aber zum einen die Rißbreite und zum anderen die Abhängigkeit der gemessenen Induktionsspannung von der Breite bekannt sein.

Es ist erkannt worden, daß die in Bauteilen einer jeweiligen Art auftretenden Risse bei jeweils typischer Materialbelastung jeweils eine dazu typische Breitenabmessung der Risse haben. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, an einem Beispiel eine nicht-zerstörungsfreie Feststellung der Breitenabmessung eines Risses vorzunehmen. Ohne die geforderte Genauigkeit zu verlassen, kann man dann diesen Wert der Breite eines Risses als Rißbreite für die übrigen Risse eines solchen Bauteils mit solcher Belastung (wie zugrundegelegt) in die Auswertung eingehen lassen. Anstelle der voranstehend beschriebenen Maßnahmenvariante, nämlich wenn die dort getroffenen Voraussetzungen nicht zutreffend sind, auch die Maßnahme zur Bestimmung der Rißbreite angewendet werden, die nachfolgend beschrieben wird. Man fertigt sich ein Muster aus zwei polierten Materialteilen des betreffenden Materials. Diese zwei Materialteile werden aneinandergedrückt, wobei zwischen ihnen ein Abstandhalter vorgesehen ist. Die Fig. 7 zeigt ein solches Beispiel mit den Teilen 71 und 72. Oberhalb des zwischen diesen Teilen künstlich erzeugten Spaltes, der mit einem Riß zu vergleichen ist, ist der Meßkopf gezeigt. Mit einer solchen Vorrichtung nach Fig. 7 können Messungen an künstlichen "Rissen" variabler Abmessung ausgeführt werden. Aus diesen Auswerteergebnissen läßt sich eine Kurve für "Meßsignal abhängig von der Nutbreite" erstellen. Diese Kurve ist genau genommen exakt richtig für unendlich tiefe Risse. Für endlich tiefe Risse ist sie eine gute Annäherung.

Anhand einer erstellten Eichkurve gemäß Fig. 8B bis 10B werden die wie oben beschrieben gemessenen Induktionsspannungen und von diesen abgeleiteten normierten Auswertegrößen mit Interpolation rechnerisch verarbeitet, um ein als äquivalente Nuttiefe bezeichnetes Maß des Risses zu ermitteln. Dieses äquivalente Maß ist als die zu ermittelnde Rißtiefe gültig.

In Kurzfassung werden nachfolgend Anwendungsbeispiele und die Verfahrensschritte derselben angegeben.

#### 1. Rißtiefenbestimmung mit Magnetometer (Fig. 8) an nutähnlichem Riß

- Klassifizierung, d. h. Ermittlung der zutreffenden Rißklasse anhand der Referenzkurve der Fig. 6. (1. Schritt)
- Definition bzw. Wahl der normierten Meßgröße  $\text{tg}\phi_{(D-M)}/\text{tg}\phi_{(M)}$  und Messungen am Referenzkörper ( $D = N$ ) an verschiedenen tiefen Nuten  $N_1, N_2, \dots$  im/in Referenzkörper(n).
- Bildung der Eichkurve  $\text{tg}\phi_{(N-M)}/\text{tg}\phi_{(M)}$  versus Nuttiefe (Fig. 8B)
- Messungen am Prüfling  $V_R$  ( $D = R$ ); die Meßergebnisse lassen sich auch aus a) entnehmen.
- Ermittlung der Meßgröße:  $\text{tg}\phi_{(R-M)}/\text{tg}\phi_{(M)}$

- Einordnen des Rißsignals in der Nuteneichkurve (Fig. 8B)
- Bestimmung der Rißtiefe

Die Fig. 8A zeigt die Spannungsvektoren und die zugehörigen Winkel  $\phi$ . Die Fig. 8B zeigt mit den Punkten die Eichkurve, gewonnen aus Referenznuten verschiedener Nuttiefe. Die Rißtiefe des Prüflings ergibt sich aus dem aus der Fig. 8A in die Fig. 8B übertragenen normierten Auswertegröße  $\text{tg}\phi_{(R-M)}/\text{tg}\phi_{(M)}$  für die Tiefe des im Prüfling detektierten Risses.

Ein zweites Anwendungsbeispiel ist nachfolgend die Bestimmung der Rißtiefe mittels eines abgeglichenen Gradiometers an einem wiederum nutähnlichen Riß:

#### 2. Rißtiefenbestimmung mit Gradiometer an nutähnlichem Riß

- Klassifizierung, d. h. Ermittlung der zutreffenden Rißklasse anhand der Referenzkurve der Fig. 6. (1. Schritt)
- Definition bzw. Wahl der normierten Meßgröße  $\text{tg}\phi_{(R)}/\text{tg}\phi_{(NN)}$  und Messungen an Referenzkörpern ( $D = N$ ) an verschiedenen tiefen Nuten  $N_1, N_2, \dots$
- Bildung einer Eichkurve  $\text{tg}\phi_{(N)}/\text{tg}\phi_{(NN)}$  mit  $\text{tg}\phi_{(N)}/\text{tg}\phi_{(NN)} = [\text{Im} V_{N1}/\text{Im} V_{NN}]/[\text{Re} V_{N1}/\text{Re} V_{NN}]$  versus Nuttiefe (Fig. 9B).
- Messungen am Prüfling  $V_R$  ( $D = R$ ); die Meßergebnisse lassen sich auch aus a) entnehmen.
- Ermittlung der Meßgröße:  $\text{tg}\phi_{(R-M)}/\text{tg}\phi_{(M)}$
- Einordnen des Rißsignals in der Nuteneichkurve (Fig. 9B)
- Bestimmung der Rißtiefe

Die Fig. 9A und 9B zeigen (den Erläuterungen zu den Fig. 8A und 8B entsprechend) die Bilder der vektoriellen Spannungen und die Bestimmung (Fig. 9B) der Rißtiefe als Schnittpunkt auf der Eichkurve der Fig. 9B.

Ein drittes Beispiel betrifft die Bestimmung der Rißtiefe mittels eines Gradiometers an einem nicht-nutenähnlichen Riß.

#### 3. Rißtiefenbestimmung mit Gradiometer an nicht-nutähnlichem Riß

- Klassifizierung, d. h. Ermittlung der zutreffenden Rißklasse anhand der Referenzkurve der Fig. 6. (1. Schritt)
- Definition bzw. Wahl der normierten Meßgröße  $\text{Im}V_R/\text{Im}V_{NN}$  versus Nuttiefe (Fig. 10B)
- Bildung der Eichkurve  $\text{Im}V_{N1}/\text{Im}V_{NN}$  versus Nuttiefe (Fig. 10B)
- Messungen am Prüfling  $V_R$  ( $D = R$ ), entnommen aus a)
- Ermittlung der Meßgröße:  $\text{Im}V_R/\text{Im}V_{NN}$
- Einordnen des Rißsignals in der Nuteneichkurve (Fig. 10B)
- Bestimmung der Rißtiefe.

Die Fig. 10A und 10B zeigen graphisch dargestellt die Verhältnisse mit wieder der Bestimmung der Rißtiefe gemäß dem Schnittpunkt mit der Eichkurve in Fig. 10B.

#### Patentansprüche

- Verfahren zur Bestimmung der Tiefe von als Defekt entdeckten Rissen und dgl. in elektrisch leitendem Material bzw. Bauteilen, mit Anwendung eines Wirbelstromverfahrens mit einem Meßkopf des wahlweisen Typs Magnetometer

bzw. Gradiometer und mit Vergleich von am Defekt ermitteltem Meßwert, mit Meßwerten, die an/in einem Referenzkörper(n) hergestellten Nuten ( $N_i$ ) ermittelt sind, gekennzeichnet dadurch, daß

- a) eine klassifizierende Einordnung eines detektierten Defekts in nutenähnliche Risse mit in die Tiefe gehend im wesentlichen gleich bleibender Rißbreite und in nicht-nutenähnliche Risse mit anderweitigem Rißbreite-Verlauf anhand von Meßergebnissen, die mittels des ausgewählten Meßkopfes als komplexe Induktionsspannung ( $V_D = V_R$ ) am Ort eines Defekts (D)/Risses (R) gemessen worden sind;
- b) abhängig von der Rißklasse und dem gewählten Typ des Meßkopfes wird eine normierte Meßgröße gewählt, die der Normierung der jeweils nach Betrag und Phase gemessenen Induktionsspannung dient,
- c) aus den normierten gemessenen komplexen Induktionsspannungen, gemessen an Nuten verschiedener Tiefe des/der Referenzkörper wird eine Nuteneichkurve (Fig. 8B, Fig. 9B, Fig. 10B) gebildet,
- d) die am Prüfling gemessenen komplexen Induktionsspannung ( $V_R$ ) wird
- e) in normierte Meßgröße umgesetzt,
- f) in die Nuteneichkurve eingesetzt und
- g) aus der Nuteneichkurve die tatsächliche Rißtiefe bestimmt.

## 2. Verfahren nach Anspruch 1

bei dem an in dem Referenzkörper hergestellten Nuten ( $N_i$ ), die ausgewählt unterschiedliche Nuttiefe haben, die jeweiligen Induktionsspannungen ( $V_{Ni}$ ) gemessen werden, eine der Nuten als Normnut ausgewählt wird und anhand der an dieser Nut gemessenen Induktionsspannung ( $V_{NN}$ ) die Induktionsspannungen ( $V_{Ni}$ ) normiert werden, aus den normierten Spannungswerten die Eichkurve (Fig. 8 bis 10) gebildet wird, die am Defekt/Riß des Prüflings auftretende Induktionsspannung ( $V_D = V_R$ ) gemessen wird, die normierte Meßgröße  $\tan \varphi_{(D-M)}/\tan \varphi_{(M)}$  für Manometer oder  $\tan \varphi_{(D)}/\tan \varphi_{(NN)}$  für Gradiometer ermittelt wird, der ermittelte Werte in das Diagramm der Eichkurve (Fig. 8 und 9) eingesetzt wird und aus der Nähe des in das Diagramm eingesetzten Meßpunktes zur Eichkurve die Entscheidung, ob nutenähnlicher Defekt oder nicht-nutenähnlicher Defekt vorliegt, getroffen.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem als Normnut die tiefste Nut der hergestellten Nuten ( $N_i$ ) ausgewählt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, mit Messung mit Magnetometer, bei dem als normierte Meßgröße  $\tan \varphi_{(D-M)}/\tan \varphi_{(M)}$  der am Defekt gemessenen Induktionsspannung ausgewählt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, mit Messung mit Gradiometer, bei dem als normierte Meßgröße  $\tan \varphi_{(D)}/\tan \varphi_{(NN)}$  der am Defekt gemessenen Induktionsspannung ausgewählt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, für die Bestimmung der Tiefe eines nicht-nutenähnlichen Defekts/Risses im Material, bei dem als normierte Meßgröße der Quotient aus dem Imaginärwert der Induktionsspannung ( $V_D$ ) am Defekt/Riß oder der Induktions-

spannung ( $V_{Ni}$ ) an der i-ten Nut und dem Imaginärwert der Induktionsspannung ( $V_{NN}$ ) an der ausgewählten Normnut als normierte Meßgröße ausgewählt wird.

( $\text{Im } V_R/\text{Im } V_{NN}$ ;  $\text{Im } V_{Ni}/\text{Im } V_{NN}$ ).

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, bei dem die Induktionsspannungen ( $V$ ) bei verschiedenen Frequenzen der Erregung gemessen werden.

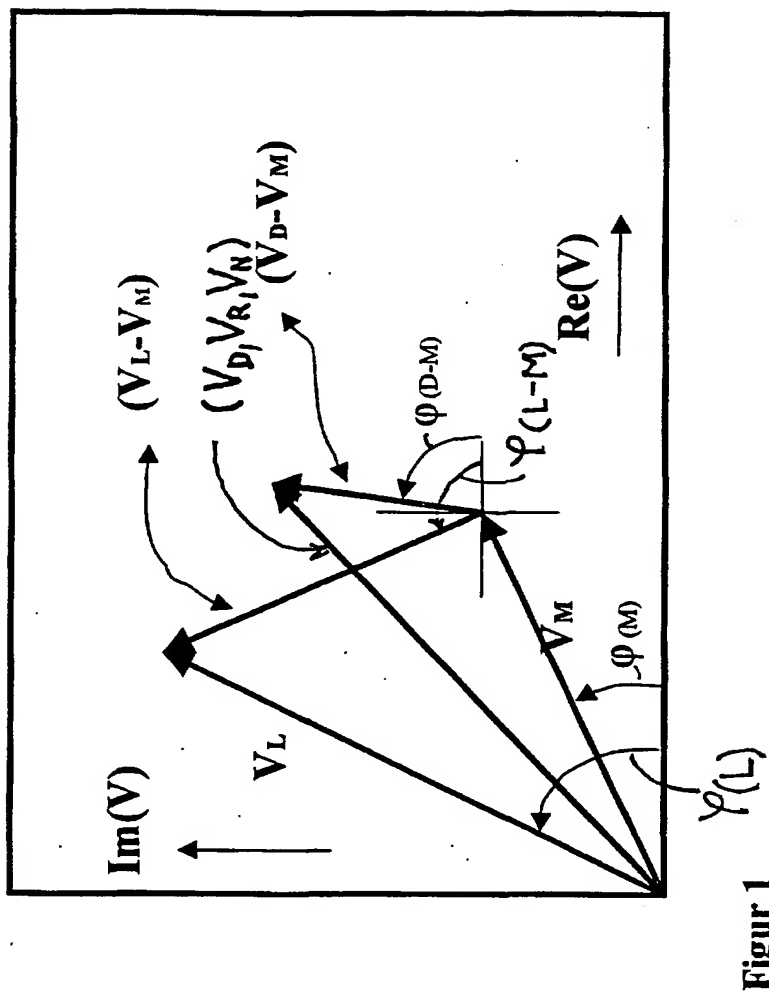
---

Hierzu 10 Seite(n) Zeichnungen

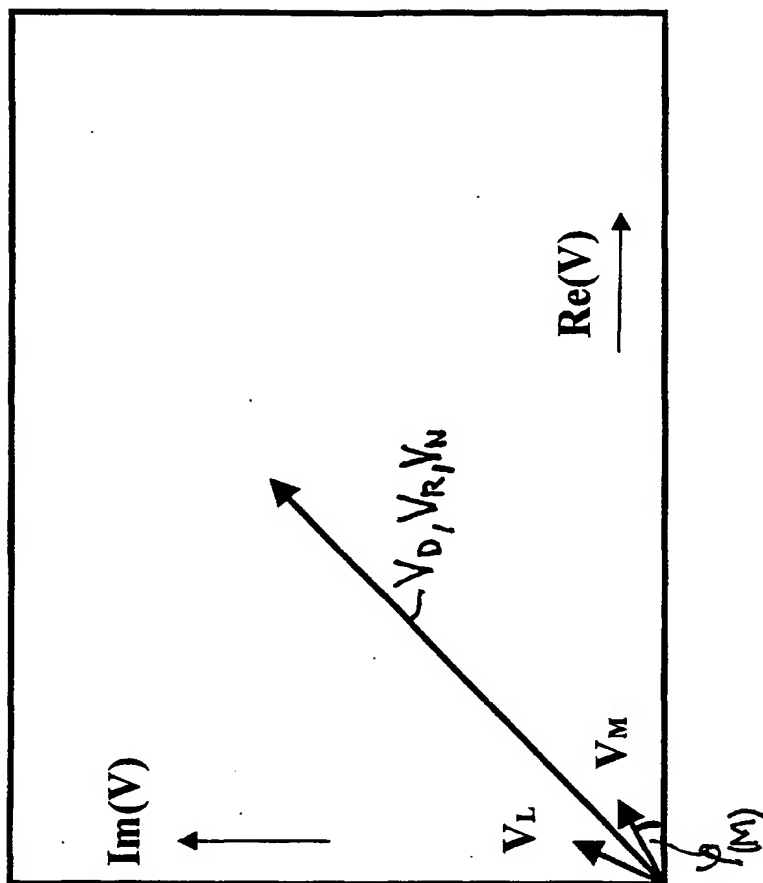
---

- Leerseite -

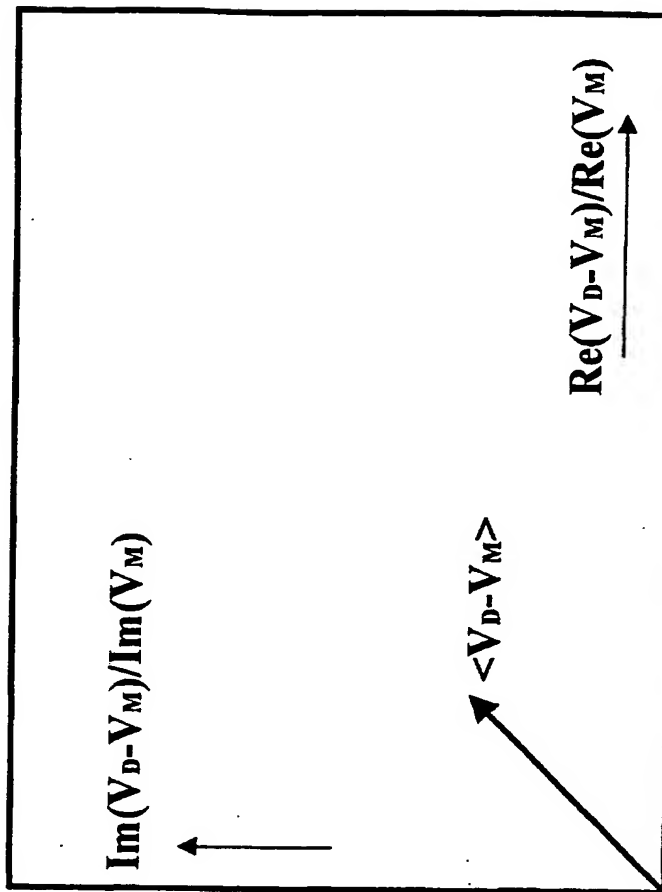




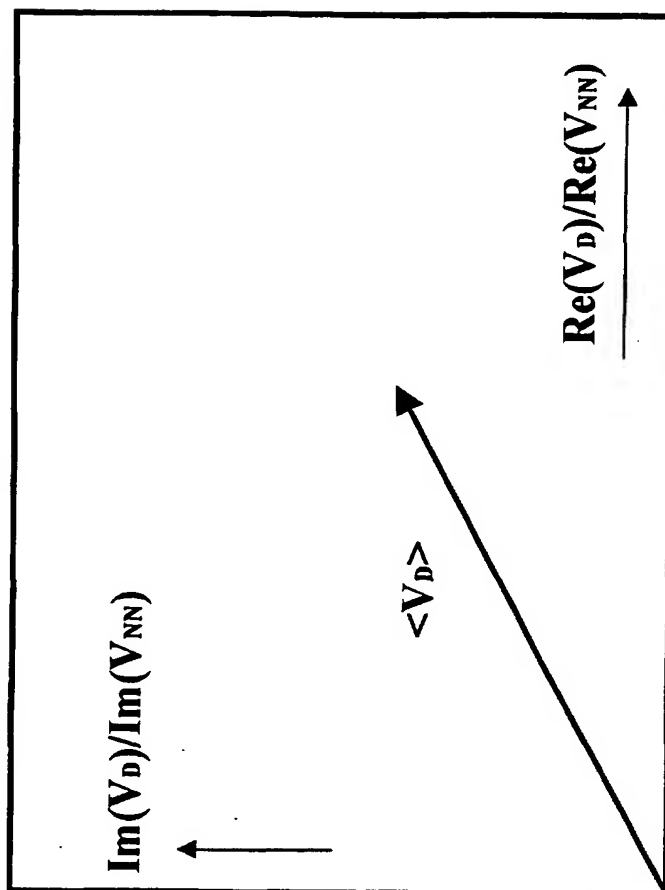
Figur 1



Figur 2

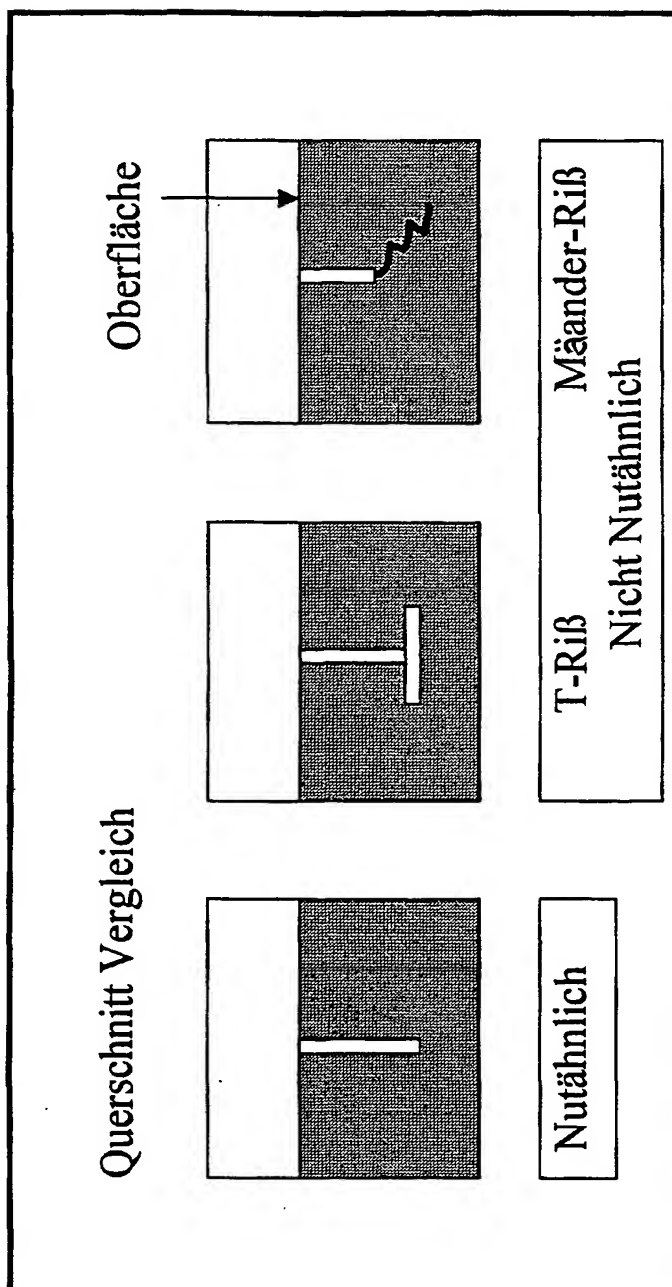


Figur 3:  $D = R = N$

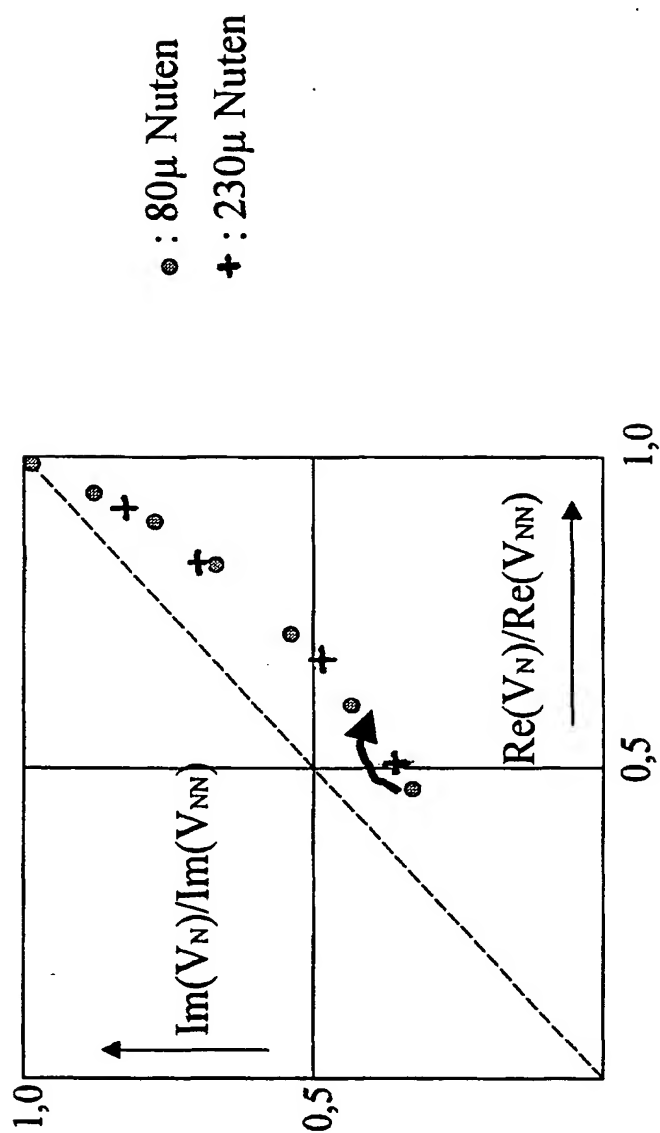


$D \sim R \sim N$

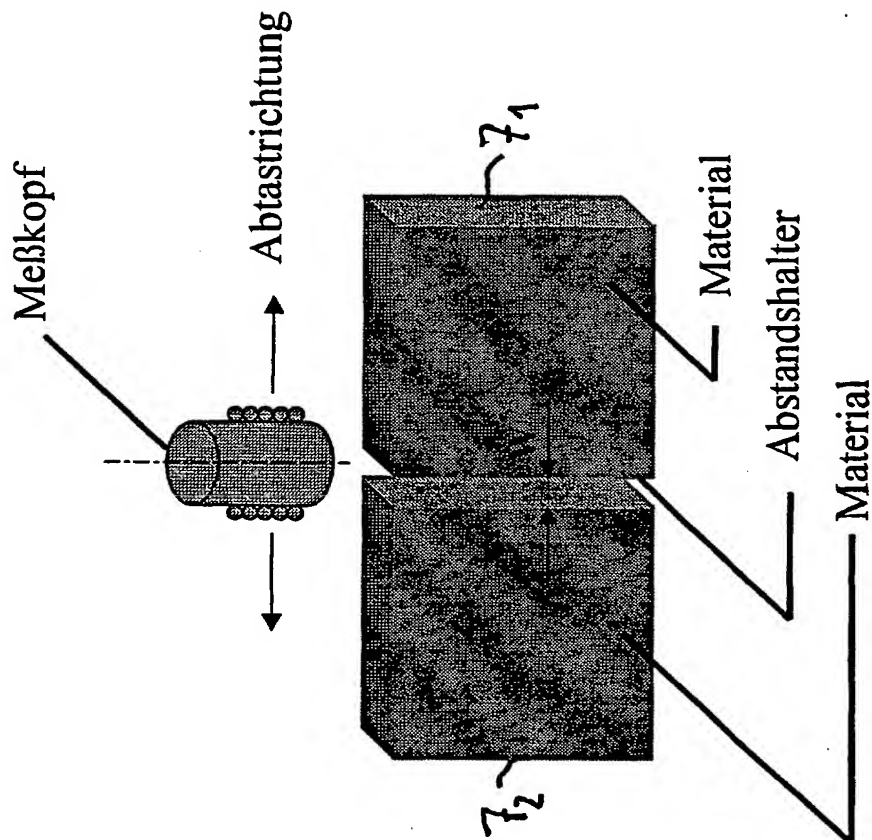
Figur 4:



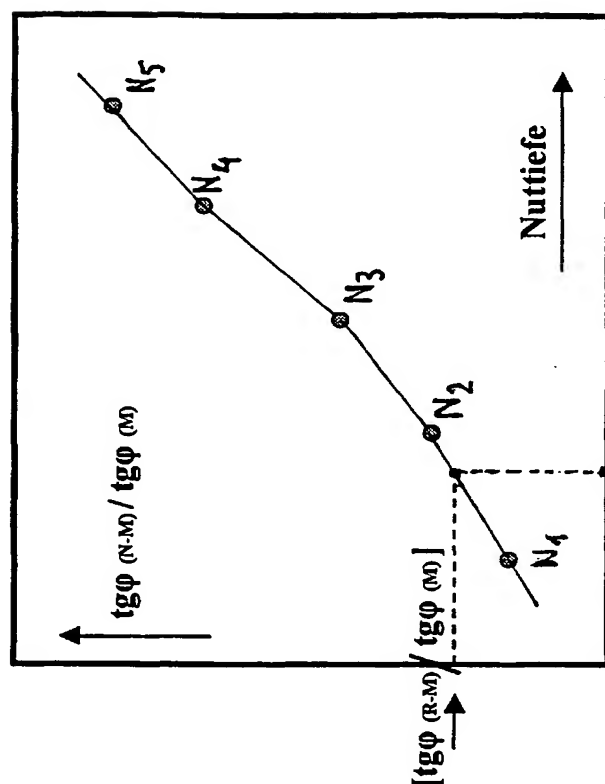
Figur 5:



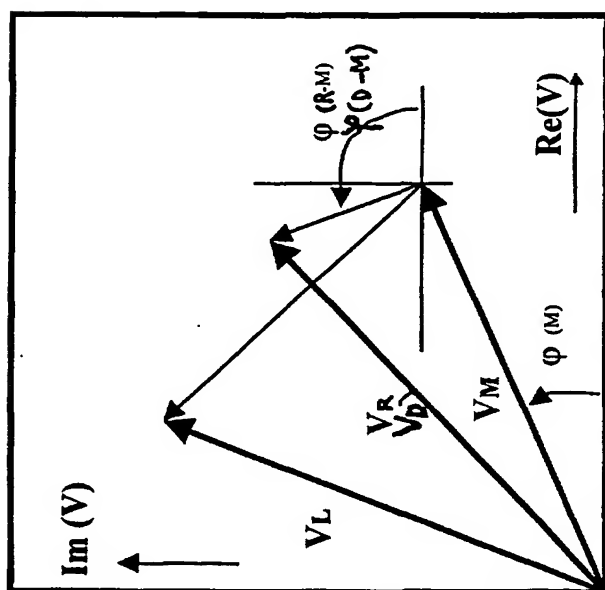
Figur 6:



Figur 7

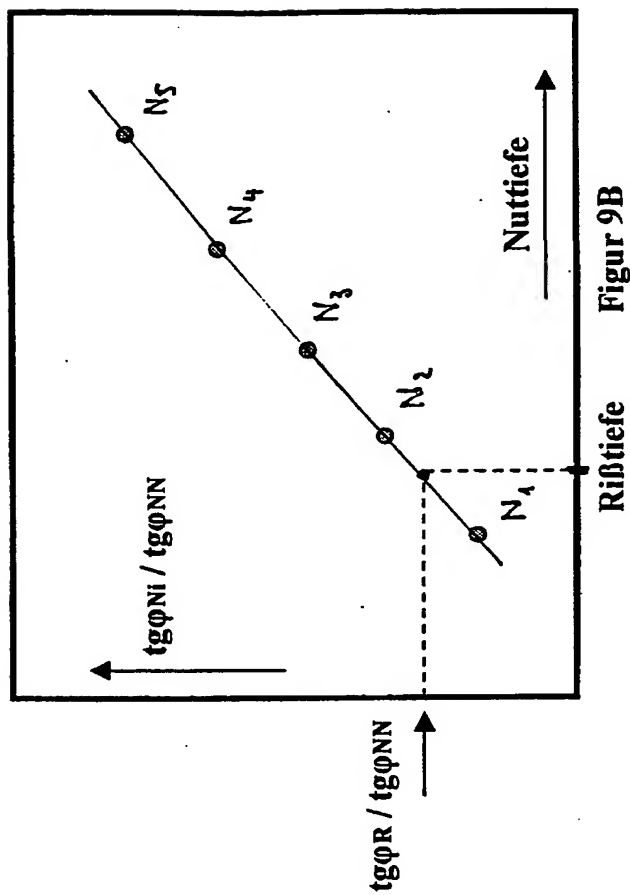


Figur 8B

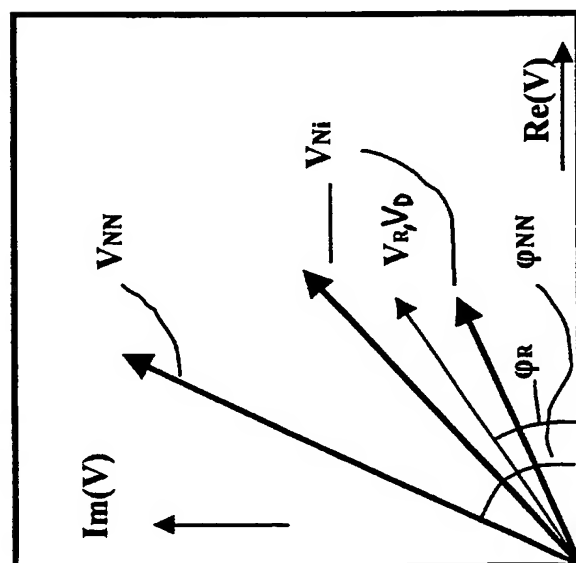


Figur 8A

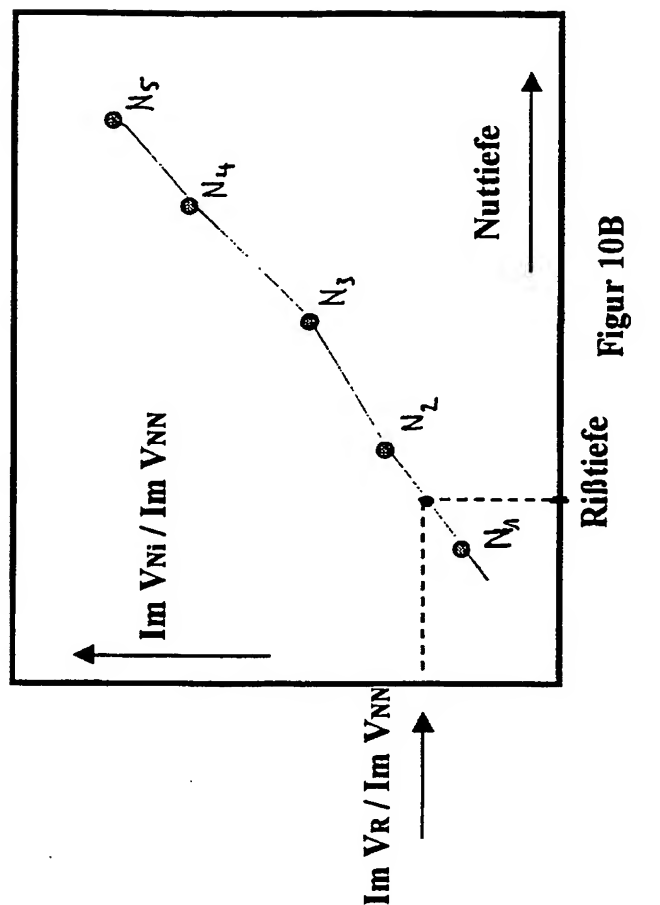




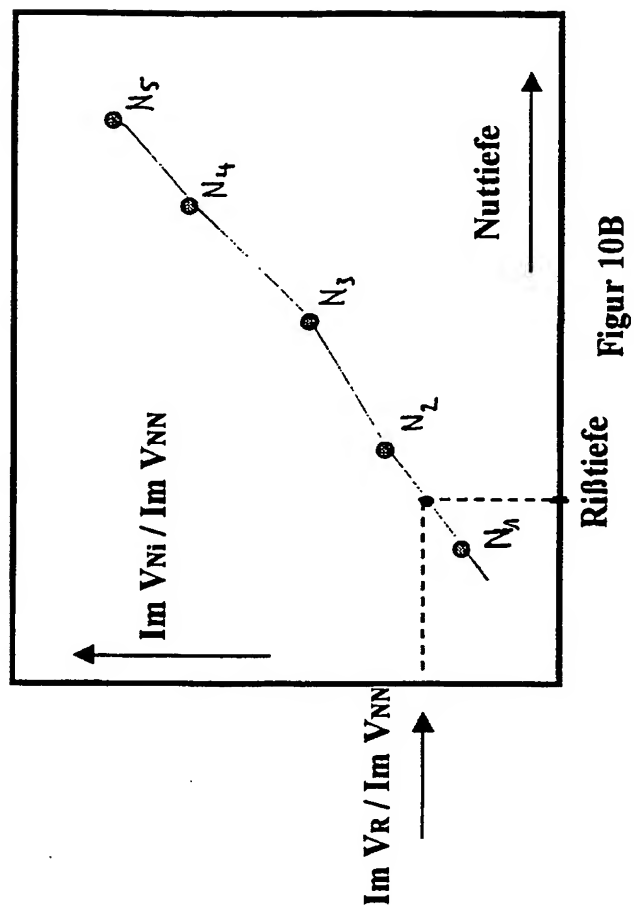
Figur 9B



Figur 9A



Figur 10A



Figur 10B